

不同沈下する粘性土地盤上の 砂質地盤の液状化に関する実験的研究

北出 圭介¹・一井 康二²・高町 茉莉³・松野 隆志⁴・井合 進⁵・飛田 哲男⁶

¹正会員 中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島県広島市南区出汐二丁目3-30)
E-mail: kitade@cecnet.co.jp

²正会員 広島大学 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 広島大学 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: m131819@hiroshima-u.ac.jp

⁴正会員 元広島大学 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁵正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: iai.susumu.6x@kyoto-u.ac.jp

⁶正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: tobita.tetsuo.8e@kyoto-u.ac.jp

粘性土地盤においては、不均質な地盤構成等に起因する不同沈下が地表面に発生することがある。このように不同沈下する粘性土地盤上に砂質土を埋立てた場合、上層の埋立土の状態は様とならず、地震時の液状化の発生も様とならない可能性がある。本研究では、遠心載荷装置を用いた実験を実施し、不同沈下が発生した場合の上部層の地盤内応力の変化および地震時の液状化の様相を検討した。その結果、不同沈下により地盤内応力が変化し、地震前の地盤内応力が不均一となることを確認した。一方で、地震時の水圧上昇量は、地盤内応力の不均一にかかわらず、ほぼ同様の値であった。

Key Words : uneven settlement, liquefaction, centrifugal model experiment

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から300km～500km離れた関東地方沿岸部においても広範囲で液状化による被害が多く発生した¹⁾。特に東京湾沿岸部での液状化現象は従来の想定を超えるものであり、多くの検討がなされている。例えば、浅岡ら²⁾は、液状化層の深部に堆積する粘土層の存在およびその地層傾斜が液状化の発生に及ぼす影響を検討している。福武ら³⁾は本震における地震動の継続時間が長かったことと、余震による揺れが、液状化の発生に大きく影響していたことを有効応力解析で確認している。高野ら⁴⁾は、埋立年代が液状化の程度に影響していると指摘している。一方で、高町ら⁵⁾は、浦安の埋立地の液状化被害に関して、埋立年代の影響は小さく、沖積粘性土層の層厚が有意に影響していると考えられることを示している。

このような広範囲の液状化被害の経験を踏まえ、埋立地に対する液状化予測の高度化が求められている。液状化の予測については、1968年十勝沖地震までの液状化事

例を参考にした土田ら⁶⁾による限界N値の方法が1970年に提案された後、1981年には液状化指数PL値による方法⁷⁾、1986年には土の粒度とN値による方法⁸⁾が提案されている。これらの方法は、その後もいくつかの改良が加えられているが、基本的にはN値により地盤の状態を評価し、想定される地震動の強さと地盤の状態を比較することで、液状化の可能性を評価している。

しかし、実際の地盤のN値は、埋立後にも粘性土地盤の圧密沈下等により、時間とともに変化していく可能性がある。例えば、1993年に発生した釧路沖地震における泥炭地盤上の盛土の被害については、その被災メカニズムとして、泥炭地盤の沈下により生じた盛土部が液状化層となった可能性が指摘されている⁹⁾。残念ながら実際には存在していないと思われるが、もし、当該地点において盛土造成直後と地震直前の地盤調査結果があれば、地盤のN値が変化していた可能性が高いと考えられる。

埋立地においても、粘性土地盤の圧密沈下等により、時間とともにN値が変化していく可能性が考えられる。例えば、1989年～2005年ごろに造成された埋立地(羽田

空港)¹⁰⁾における、新旧のN値分布を図-1に示す。図-1(a)は1991年に実施された地盤調査の結果¹¹⁾であるが、層厚約50mの粘性土上にN値5前後のほぼ均質な埋め立て地盤が造成されている。これに対し、図-1(b)は2005年に近傍(離隔70m程度)で実施された地盤調査の結果¹¹⁾である。圧密沈下により、孔口標高が低下している点を考慮すると、粘性土層との境界の位置は、それほど大きな違いはみられない。また、埋立層のN値についても、全般的にはほぼ同様の値である。しかし、詳細にみると、2005年の柱状図の深さでみた場合、表層である0~-10mおよび-14~-22mのN値は増加し、-10~-14mおよび-22~-27mのN値は減少しているように見受けられる。この差異の原因としては、約70mの離隔であっても、2地点が同一ではないため、そもそもの埋立地盤が不均質であったことが考えられる。しかし、比較的均質な成層地盤における実務設計¹²⁾では、相当の重要プロジェクトでもない限り、20~30m間隔といった高密度の地盤調査を当初から実施することはない。すなわち、一般には50~100m程度の離隔の範囲に対しては、当該地域の地形的・地質的考察において特別に示唆されることがなければ、ほぼ同一の地盤条件であると仮定することが多い。すなわち、当該2地点はほぼ同一の地盤条件であったと仮定することも順当であり、埋立後に、何らかの理由(本研究では、具体的には、粘性土地盤の圧密沈下の影響があると考えている)によって、地盤状態が変化して違いが生じた可能性も考えられる。そして、そのような地盤状態の時間的変化の発生が実際に生じる現象であ

れば、埋立地の液状化予測においても、その影響を考慮することが必要であろう。

以上の問題意識により、本研究では、埋立地の地盤状態の時間的変化の可能性とその時間的変化が液状化の発生に及ぼす影響を検討した。まず、遠心力場で地盤の不同沈下を模擬した土層実験を行い、不同沈下層以浅の埋立地盤内における応力変化の有無と、応力状態の変化が地震時の液状化の発生に及ぼす影響を検討した。

2. 遠心力場での模型実験の概要

実スケール換算で10mの層厚を持つ埋立地盤において、埋立地盤直下の粘性土地盤が不同沈下したという想定で、50G場での模型実験を行った。模型の断面図と平面図を図-2および図-3に示す。図-2に示す各計測点では、水平方向と鉛直方向の土圧(全応力相当)と間隙水压を測定した。また、地表面での沈下形状を4点の変位計で測定した。土圧計は図-4のようなアルミ板の治具を作成し、アルミ板の表面に両面テープで土圧計を接着した。土層作成時に図-2に示す所定の高さに土層が達した際に、治具を土層表面に差し込む様に設置した。

不同沈下については、土槽中央部の底面を沈下させる機構(落とし戸)を設置することで模擬した。落とし戸の最大沈下量は9mmであり、落とし戸直下に水を充填したゴムパイプを設置し、それを排水することで落とし戸を操作している。

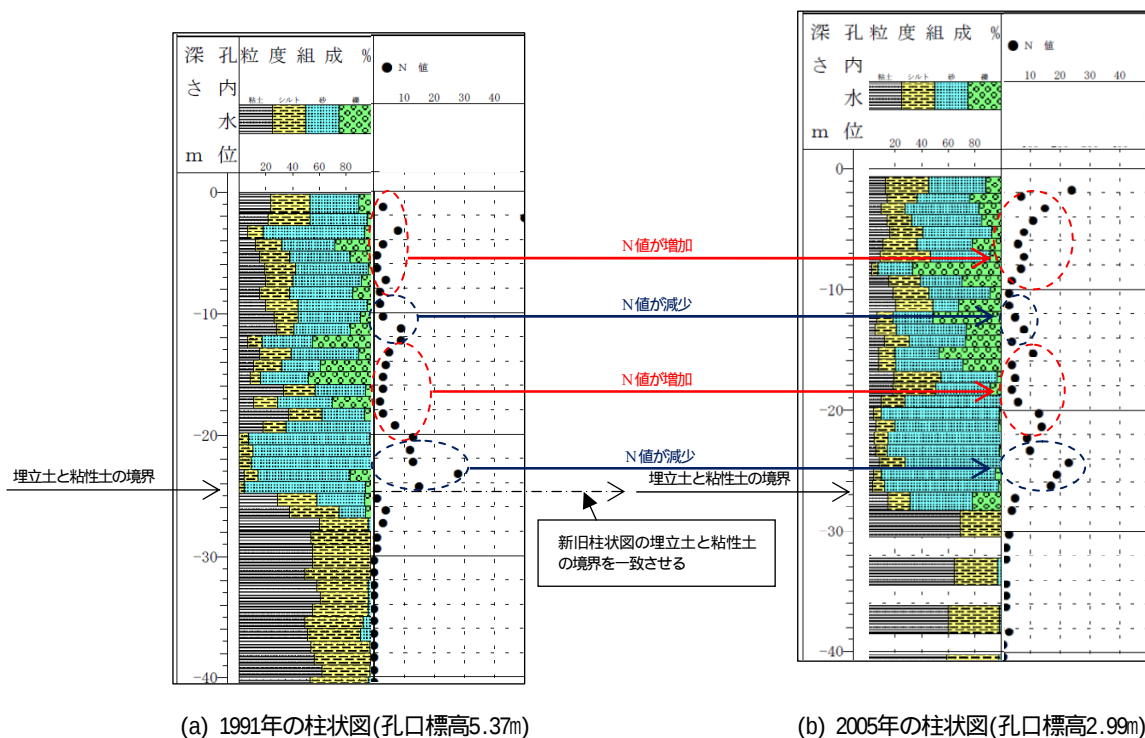


図-1 ある地点の新旧の土質柱状図の例

ゴムパイプからの排水は強制的ではなく、落とし戸に加わる土層の載荷重による排水であるが、最大沈下量近くまでは沈下していると考えられる。また、落とし戸が落ちた際に上層地盤の沈下形状が滑らかになるように、底面には厚さ1cmのシリコンゴム板を敷設した(図-2)。この結果、土層底面は滑らかに変形することとなり、より現実の不同沈下形状に近い状態が模擬できたと推測される。

埋地地盤を模擬した、シリコンゴム上の砂地盤は、豊浦砂を用いて水中落下法にて作成した(相対密度が約50%)。なお、間隙水は粘性流体でなく、水道水を用いた。模型地盤作成後の状況の例を図-5に示す。地盤の沈下状況を側面から確認できるように、赤色に着色したそば乾麺棒を2cm間隔(実スケール換算で1m間隔)で設置した。この図では、赤色のそば乾麺棒とそれを目安に土層前面のガラス表面に描いた線が2重写りしている。ただし、土圧側面の摩擦軽減については、特別な処理は行っていない。

模型地盤を作成後、遠心載荷前に落とし戸が落下できるように落とし戸のロックを開放し、遠心加速度を増加させた。遠心力載荷前の時点では、シリコンゴム板の剛性により地盤の沈下は発生していない。しかし、遠心加速度を上げていくにしたがって落とし戸の機構が作動し、徐々に地表面にも沈下が発生した。最終的な落とし戸の動作状況の例を図-6に示す。載荷後に1G場で確認したが、落とし戸は最大沈下量の9mmまで作動している。また、赤色乾麺棒の変形については、土層上層は直線状であるのに対し、土層下部にしたがってシリコンゴムの不同沈下形状に近づくような曲線状になっている。再現性を検討するため、同じ条件の実験を2回実施した。ただし、ケース1では、計測点D,E,Fの計測を実施できなかった。

遠心加速度50Gでの自重圧密が完了した後に、不同沈下が液状化の発生の有無に及ぼす影響を評価するため、加振実験を行った。加振は、最大加速度約100Gal、周波数0.02Hzの正弦波を10サイクル与えた。水平加速度の時刻歴の例を図-7に示す。両ケースとも、同様の加振が実施できたことを確認している。

3. 遠心力場での模型実験の結果

(1) 不同沈下の発生による地盤内応力の変化

遠心加速度を50Gまで大きくする過程における実験結果を示す。まず、地表面の沈下量を図-9に示す。最終的な沈下量は落とし戸中心上の地表面(計測点)で約5mm、落とし戸端部上の地表面(計測点)で3~4mm、落とし戸外側の地表面(計測点)で約2mmである。落とし戸の沈下量(つまり砂層底面の不同沈下量)は

9mm弱と推測されるが、実際の地表面沈下量はそれよりも小さく、また、地表面での不同沈下量はさらに小さい。この原因として、図-8に示すような、落とし戸外側の底面から構築されるアーチ構造が地表面の沈下を抑制した可能性が考えられる。しかし、土層側面の摩擦の影響も考えられ、以下の結果の解釈には注意が必要である。なお、計測点 および でみられた約2mmの沈下は、50Gの遠心力による自重圧密沈下であると思われる。

土圧計から得られた値は全応力相当の圧力を図-10に、間隙水圧計で測定した水圧を図-11に示す。また、有効応力相当の土圧は、土圧計の値から水圧を差し引いて求め、図-12に示す。また、不同沈下しない水平成層を仮定した全応力、水圧および土圧の理論値も同時に示している。

図-10において、計測点B,Cの2回目の値を除いて、鉛直応力は全て理論値より小さな値となっている。一方、水平応力については、計測点C,E,Fでは理論値より小さくなっているが、計測点A,B,Dでは理論値と同程度の値である。この結果、落とし戸中心の上に位置する計測点A,Dでは水平応力より鉛直応力の方が小さい。これは、不同沈下の影響による地盤内応力変化であると推定される。

図-11に示す水圧は、遠心加速度の増加とともに理論値より小さくなっているものの、概ね理論値と同程度の値を示している。そして、図-12に示す土圧でも、落とし戸中心の上に位置する計測点A,Dについては水平土圧よりも鉛直土圧が小さい結果となる。特に計測点Aの1回目の計測では、0~30Gの遠心加速度では鉛直応力よりも水圧が大きく、土圧が負の値となる。つまり、図-8に示すようなアーチ効果によって上載荷重が支えられるため、計測点Aでは有効応力が0の状態になっていると考えられる。土圧の計測は一般に難しく、ある程度の誤差が本実験でも生じている可能性はあるが、2ケースともほぼ同様の結果であり、この点に関しては再現性が高いと思われる。また、計測点D,Eについては、1ケースのみの結果であるが、理論値よりも小さい土圧の値が示されている。こちらは、1ケースのみの計測であり、再現性を議論できる状態にはないが、図-8に示すようなアーチ効果と整合する結果である。計測点Fについても、理論値よりも小さい土圧の値が得られているが、こちらは不同沈下に起因するアーチ効果ではなく、土層端部に存在するアーチ効果の可能性が考えられる。

一方、計測点B,Cについては、特に鉛直荷重において2ケースの実験結果が大きく異なっている。この点については、今後、FEM解析等により詳細に検討していく予定である。

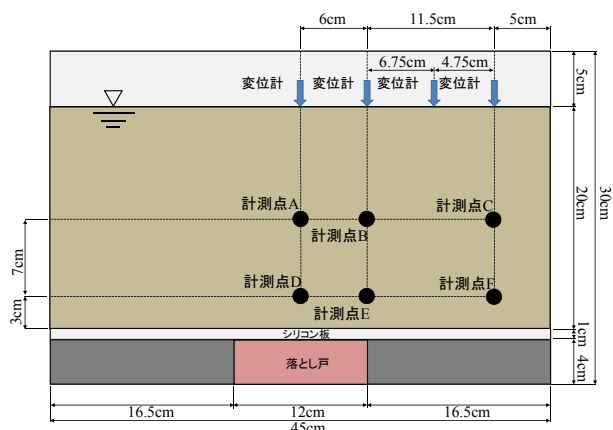


図-2 模型及び計測位置の断面図

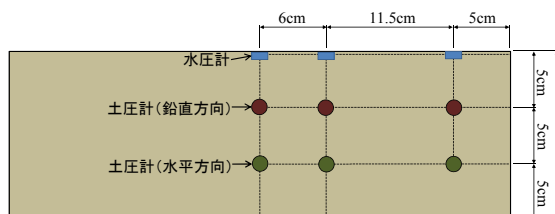


図-3 模型及び計測位置の平面図

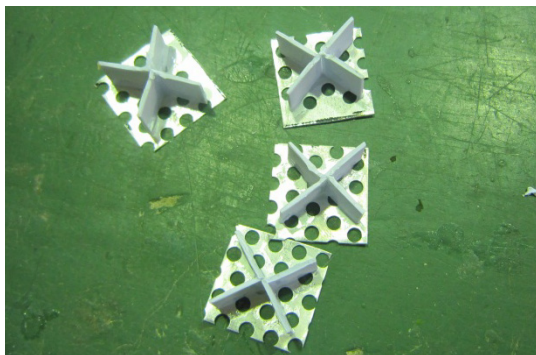


図-4 土圧計設置用治具

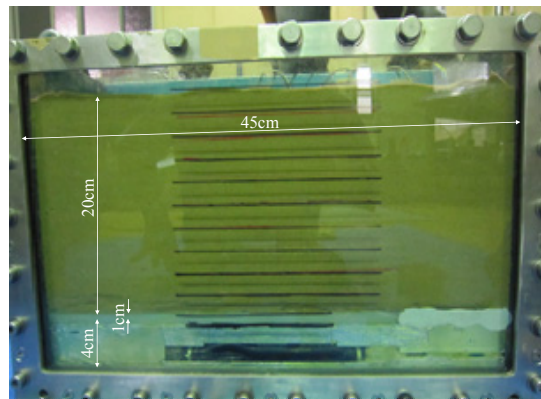


図-5 模型作成状況

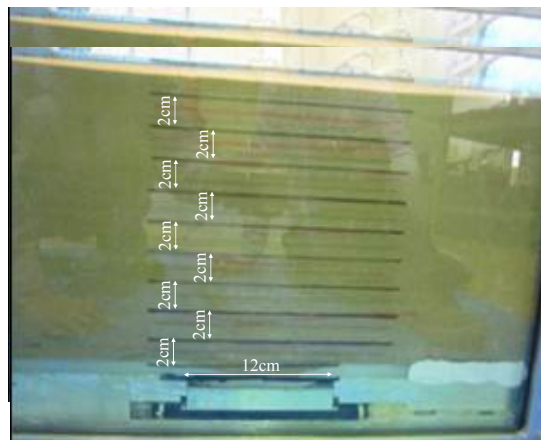


図-6 落とし戸動作状況

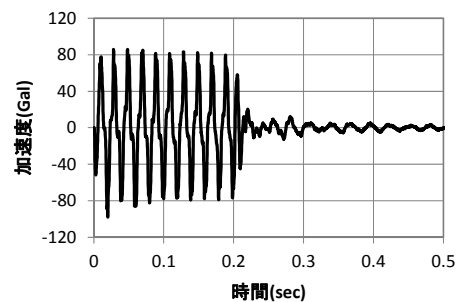


図-7 水平加速度時刻歴

(2) 加振時の水圧上昇への影響

図-13に土圧計の計測結果を示す．なお，不同沈下しない水平成層を仮定した全応力の理論値も破線で示している．全ての計測点で加振開始直後に鉛直応力と水平応力の両方が大きくなる．これは図-14に示すように，間隙水圧が上昇していることが影響していると考えられる．

落とし戸から離れた位置にある計測点C,Dについては，上昇した間隙水圧の消散により，加振後半には鉛直応力及び水平応力ともに理論値に近づく結果となっている．一方，落とし戸中心の上の計測点A，落とし戸端部の上の計測点B,Eについては，過小評価されていた鉛直応力

が上昇し，理論値に近づく傾向が見られる．ただし，水平応力は2ケースでやや異なる挙動を示している．計測点Dについては，加振前半に増加した後，間隙水圧の消散にともなって減少に転じ，ほぼ加振前の応力状態に戻る傾向を示す．

図-14に示す間隙水圧においては，1回目と2回目の実験でほぼ同等な挙動を示している．また，加振中に水圧の低下が生じており，過剰間隙水圧の消散が生じていると考えられる．加振による水圧の上昇の程度は，同じ高さの各計測点（A,B,CあるいはD,E,F）で同程度であるが，落とし戸から離れるにしたがって，加振に伴う水圧の変

動が大きい．なお，計測点Cについては，加振後においても水圧が大きく挙動しており，計測器に何らかの異常があった可能性がある．

図-15に示す土圧については，土圧計と間隙水圧計の双方が精度良く測定できている必要があるのにたいし，計測が不安定であったセンサーが実際にはあったため，不安定な計測結果となった．落とし戸上の計測点A,Bで

は，加振開始直後は間隙水圧の上昇に伴い鉛直土圧，水平土圧ともに低下するが，その後は間隙水圧の消散に伴い増加する．この挙動は定性的には納得できるものではあるが，最終的な土圧の値は，理論値よりも大きな値となり，この理由は明らかではない．地盤下部の計測点D,Eでは，土圧に大きな変化はなく，理論値とも大きく異なる値となる．この理由も不明である．

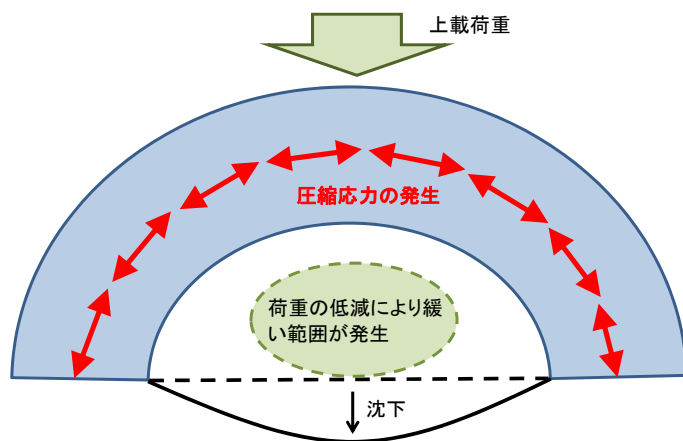


図-9 アーチ構造発生概念図

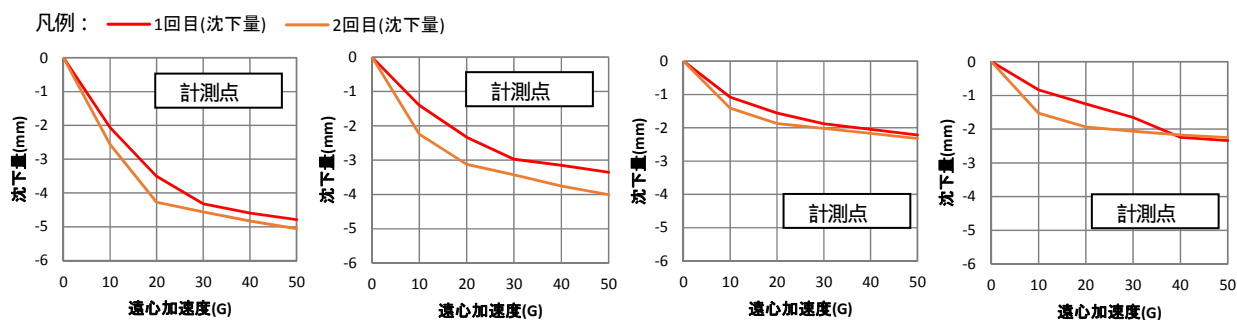


図-10 遠心加速度の増加に伴う地表面の沈下

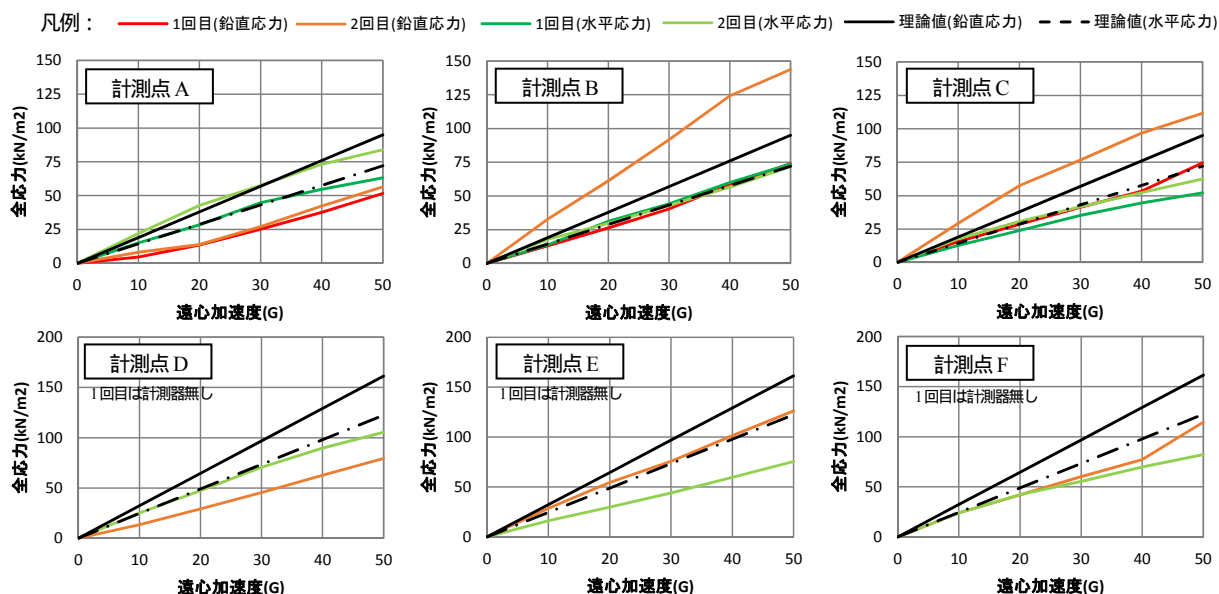


図-11 遠心加速度の増加に伴う全応力の増加

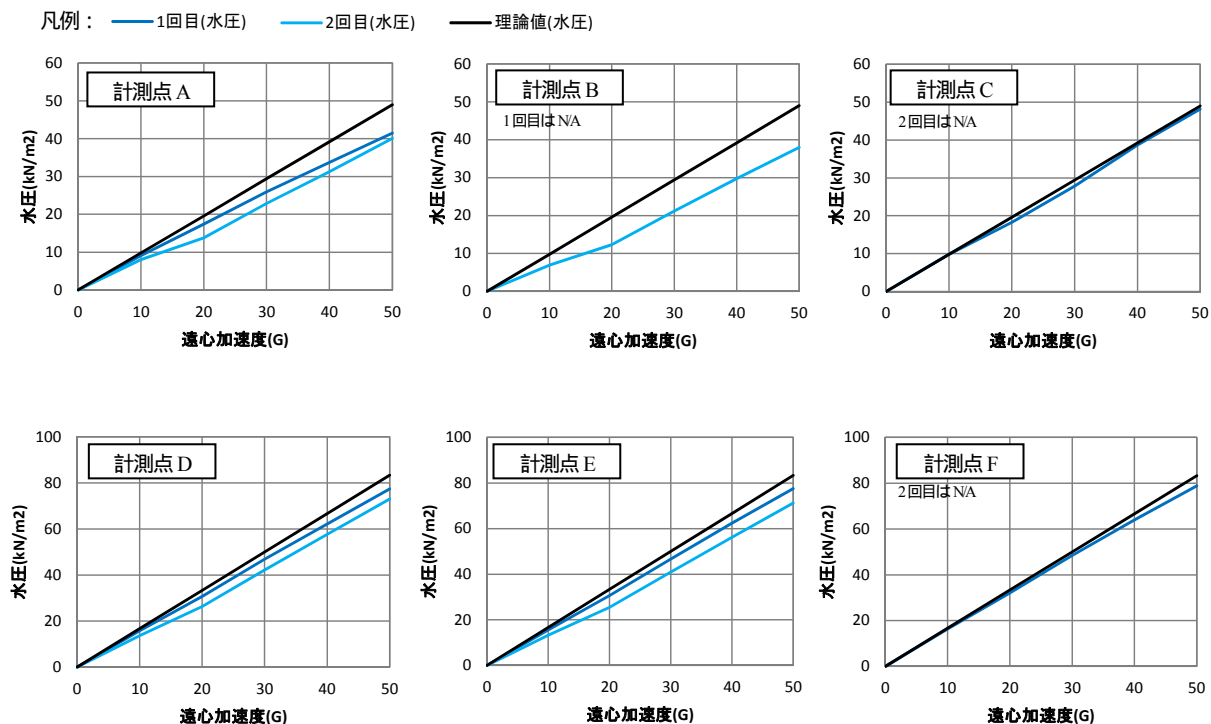


図-12 遠心加速度の増加に伴う水圧の増加

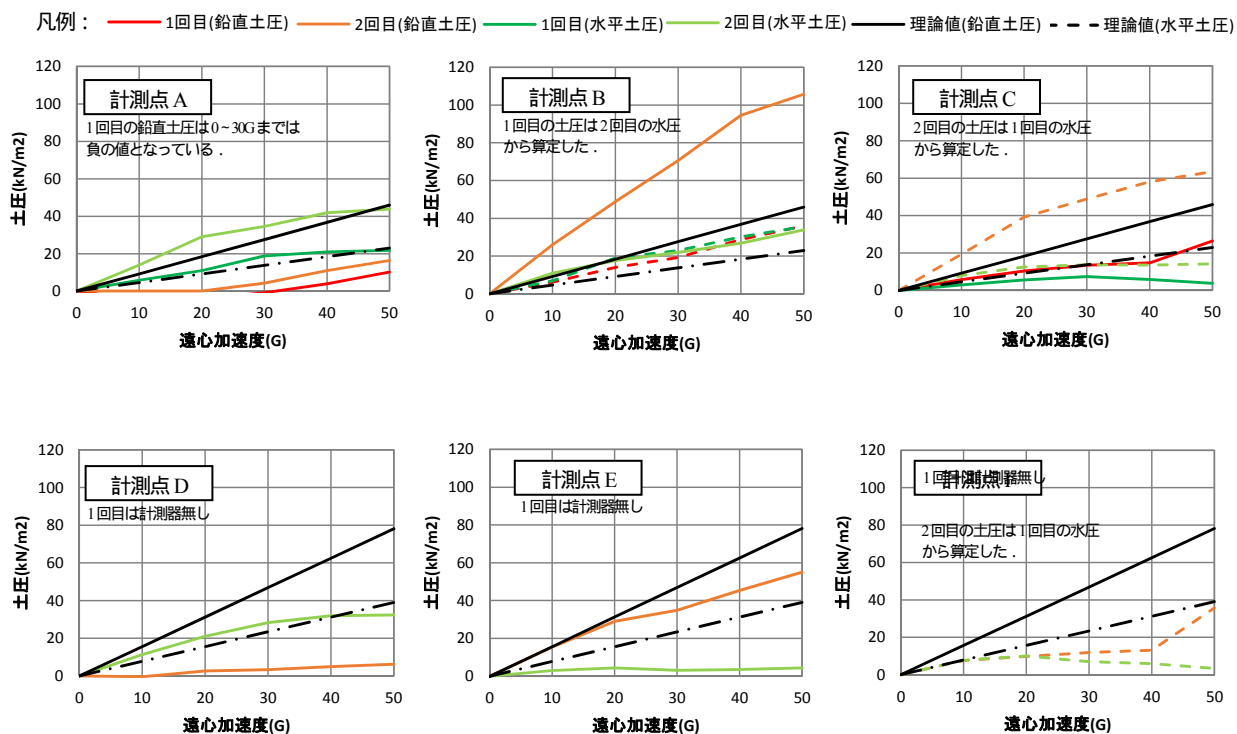


図-13 遠心加速度の増加に伴う土圧の増加

凡例： — 1回目(鉛直応力) — 2回目(鉛直応力) — 1回目(水平応力) — 2回目(水平応力)
 — 50G場の鉛直応力の理論値 — 50G場の水平応力の理論値

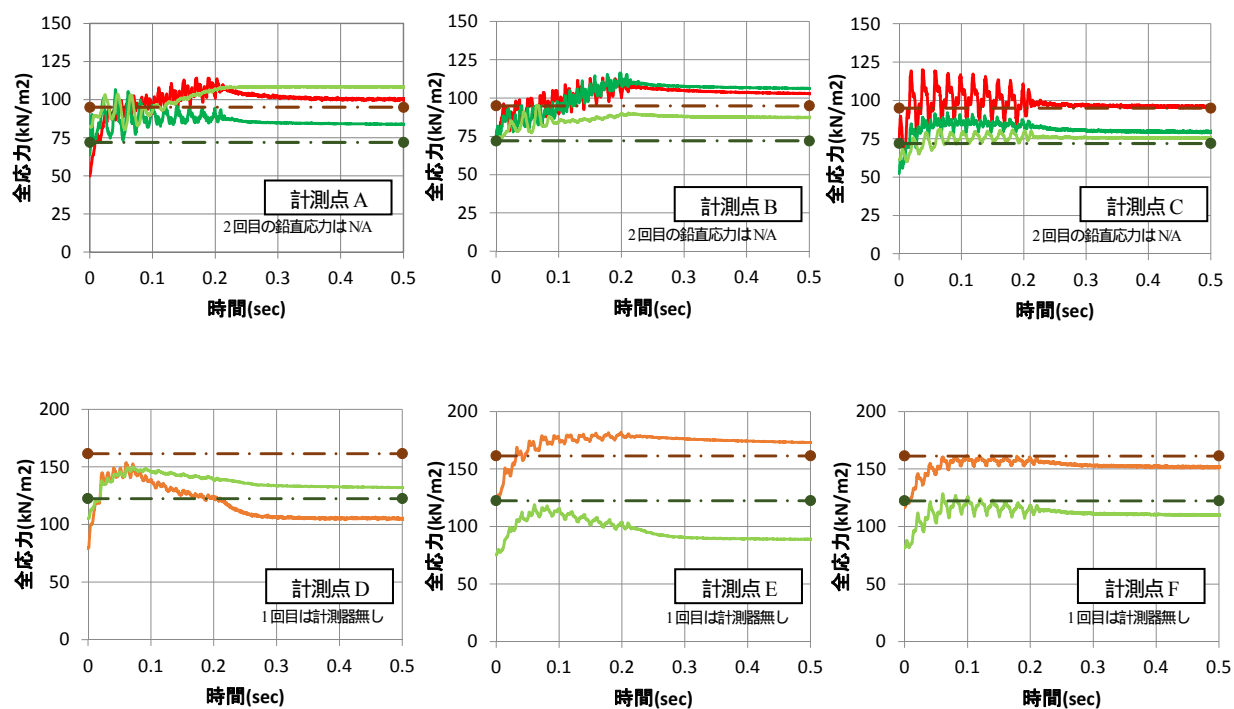


図-14 加振に伴う全応力の変化

凡例： — 1回目(水圧) — 2回目(水圧) — 50G場の水圧の理論値

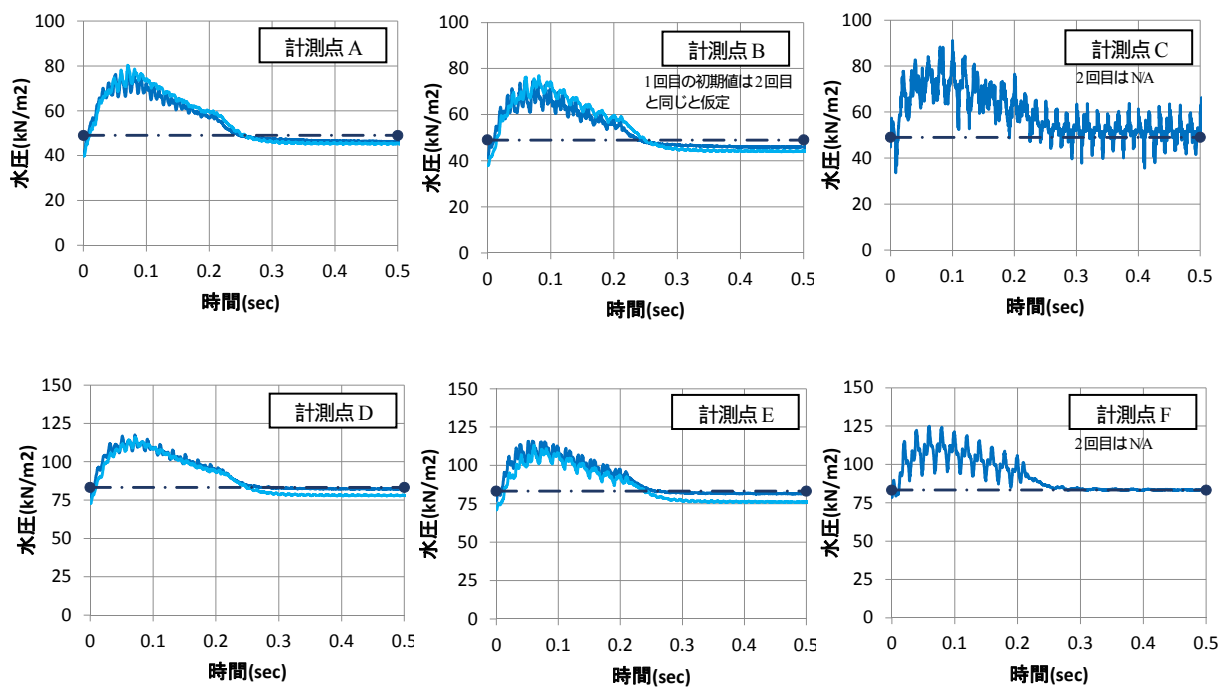


図-15 加振に伴う間隙水圧の変化

(3) 実験結果のまとめ

以上のように、実験結果から以下のことがあきらかとなった。

- ・不同沈下を模擬した落とし戸中心上の地盤では、不同沈下の影響により水平応力よりも鉛直応力が小さくなる。特に、不同沈下部中心（計測点A）では有効応力がゼロになっている状態が生じた。これらは不同沈下により発生するアーチ効果によるものと考えられる。
- ・間隙水圧は、アーチの効果を受けることなく、計測値が理論値と一致した。
- ・加振による水圧の上昇は、同一深度の計測点で同程度であった。ただし、不同沈下部から離れた計測点では水圧の変動幅が大きくなった。

4. 結論

本研究では、埋立地の地盤状態の時間的変化の可能性とその時間的変化が液状化の発生に及ぼす影響を遠心模型実験により検討した。検討の結果、以下のことが明らかとなった。

- ・不同沈下により地盤内にアーチ構造が発生し、不同沈下部上の地盤では鉛直土圧が小さくなるなど地盤内応力が変化することが確認できた。この変化は、一般の埋め立て地盤では、N値の変化などに反映される可能性がある。
- ・不同沈下により地盤内応力が不均質となった地盤においても、加振による水圧の上昇は、同一深度の計測点で同程度であった。初期の応力状態が不均質であることを踏まえると、過剰間隙水圧の上昇が及ぼす影響も不均質であると推測される。

以上から、埋立地の液状化予測の高度化のためには、今後、埋立直後の地盤調査結果のみを用いるのではなく、検討対象時点の地盤状態を念頭に置いた液状化予測を行っていくこと、圧密沈下等に伴う地盤の不均質性等が存在している可能性があるということ等の点を検討していく必要性が示唆されたといえる。ただし、今回は限られた実験ケースの分析による検討であり、今後、実際の埋立地を詳細に地盤調査するなど、検証を行っている必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B：課題番号23310119）、京都大学防災研究所一般共同研究（課題番号24G-10）の助成を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書，2011.
- 2) 浅岡顕，野田利弘，中井健太郎：深部地層傾斜がもたらす表層地盤の液状化被害の非一様性，公益社団法人地盤工学会 第47回地盤工学研究発表会，pp.1511-1512，2012.
- 3) 福武毅芳，張至鎬：2011年東北地方太平洋沖地震における浦安地区の有効応力解析による分析，公益社団法人土木学会 第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，Vol.31，p2-004，2011.
- 4) 高野務，安田進，金丸功希，橋本尚，荻谷俊吾：東に本題震災で液状化した東京湾岸の埋立歴史と土層断面図，公益社団法人土木学会 年次学術講演会講演概要集第1部，Vol.66，pp.1011-1112，2011.
- 5) 高町茉莉，一井康二，北出圭介：地盤条件の差異が液状化の被害程度に及ぼす影響について～東日本大震災における浦安市の被害事例の分析から～，公益社団法人地盤工学会 中国支部論文集「地盤と建設」，2013(投稿中).
- 6) 土田肇：砂質地盤の流動化の予測と対策，昭和45年度港湾技術研究所講演概要，pp.(3)-1-(3)-33，1970.
- 7) 旧建設省土木研究所：地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究，土木研究所資料1729号，1981.
- 8) 旧運輸省港湾技術研究所：粒度とN値による新しい液状化予測法，港湾技術研究所報告，Vol.25，No.3，1986.
- 9) 林宏親，西本聡，橋本聖，梶取真一：泥炭地盤に築造された盛土の地震による変形メカニズムと耐震補強，公益社団法人地盤工学会 地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.3，pp.465-473，2011.
- 10) 国土交通省関東地方整備局：東京港の変遷 — 2011年開港70周年— （東京港の整備の歴史），<http://www.paktr.mlit.go.jp/tokyo/tekishi/pdf/e-do01.pdf>，(2013.8.31閲覧).
- 11) 国土交通省，独立行政法人土木研究所，独立行政法人港湾空港技術研究所：国土地盤情報検索サイト，<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>，(2013.8.31閲覧).

AN EXPERIMENTAL STUDY OF LIQUEFACTION OCCURRENCE OF SAND LAYER ABOVE A CLAY STRATUM WITH UNEVEN SETTLEMENT

Keisuke KITADE, Koji ICHII, Mari TAKAMACHI, Takashi MATSUNO,
Susumu IAI and Tetsuo TOBITA

The characteristics of a soil layer are not usually uniform, and uneven settlement was often observed in a clay stratum. In case of reclamation above the clay stratum, there is a possibility that the uneven settlement in the clay stratum affect the characteristics of the sand layer. Especially, the distribution of the liquefaction resistance might be affected. In this research, the stress distribution and liquefaction occurrence of the ground above the clay layer with uneven settlement were investigated a series of centrifuge model test. As a result, the non-uniform stress distribution in the ground due to uneven settlement is observed. However, the increase in pore water pressure due to shaking is almost uniform although the stress state in the ground is not uniform.